12 月 December
2020, 63(12): 1490 – 1496
昆 虫 学 报
ACTA ENTOMOLOGICA SINICA
http: //www. insect. org. cn
doi: 10. 16380/j. kcxb. 2020. 12. 007

暗期 5 h 不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响

钟春兰, 陈苏泓, 周小妹, 翁如玉, 肖国权, 郑欢欢, 涂小云*

（江西师范大学生命科学学院，南昌 330022）

摘要:【目的】探明暗期 5 h 不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 生长发育及繁殖的影响。【方法】处理组斜纹夜蛾各虫态于暗期分别接受 5 h 不同波长 LED 灯[红(620 – 625 nm)、黄(580 – 585 nm)、蓝(465 – 467 nm)、绿(520 – 523 nm)和白色(复合光)]光照,即光周期分别为 14L: 5R: 5D, 14L: 5Y: 5D, 14L: 5B: 5D, 14L: 5G: 5D 和 14L: 5W: 5D,对照组则在光周期为 14L: 10D 条件下培养,观测计算卵孵化率、化蛹率、成虫羽化率、发育历期和成虫寿命,称量蛹重,统计单雌产卵量。【结果】暗期各波长 LED 光照 5 h 对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率无显著影响;黄光处理组卵期(4.0 d)较对照(3.0 d)显著延长,而各色光处理组蛹期较对照显著缩短,且雄蛹期显著长于雌蛹期;各色光处理均使蛹重减轻,但雌雄蛹重差异不显著;各色光处理组成虫寿命较对照均延长,红光下雄虫寿命(18.4 d)显著长于雌虫(15.0 d),且红光下产卵前期最短(3.0 d),单雌产卵量最高(1 346.0 粒)。【结论】在一定条件下,暗期 5 h 不同波长 LED 光照主要影响斜纹夜蛾蛹期、蛹重及成虫寿命,但其影响因波长不同而异。

关键词: 斜纹夜蛾; LED 光照; 生长发育; 繁殖; 蛹重; 成虫寿命

中图分类号: Q968　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 0454-6296(2020)12-1490-07

Effects of 5 h LED light of different wavelengths in scotophase on the growth, development and reproduction of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)

ZHONG Chun-Lan, CHEN Su-Hong, ZHOU Xiao-Mei, WENG Ru-Yu, XIAO Guo-Quan, ZHENG Huan-Huan, TU Xiao-Yun* (College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract:【Aim】To understand the effects of exposure to 5 h LED light of different wavelengths in scotophase on the growth, development and reproduction of *Spodoptera litura*.【Methods】Various developmental stages of *S. litura* in treatment groups were exposed to LED light of different wavelengths [red (620 – 625 nm), yellow (580 – 585 nm), blue (465 – 467 nm), green (520 – 523 nm) and white (composite) light], respectively, for 5 h in scotophase, expressed as the photoperiods of 14L: 5R: 5D, 14L: 5Y: 5D, 14L: 5B: 5D, 14L: 5G: 5D and 14L: 5W: 5D, respectively, with those in the control group cultured under a photoperiod of 14L: 10D, and the egg hatching rate, pupation rate, adult eclosion rate, developmental duration and adult longevity were observed and calculated. Pupae were weighted and the number of eggs laid per female counted.【Results】Exposure to LED light of different wavelengths for 5 h in scotophase had no significant effect on the egg hatching rate, pupation rate, adult

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ191686)
作者简介: 钟春兰, 女, 1996 年 11 月生, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为动物行为生态学, E-mail: 1436862785@qq.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: txy1036@163.com
收稿日期 Received: 2020-07-15; 接受日期 Accepted: 2020-09-24

eclosion rate of *S. litura*. The egg duration of the yellow light group (4.0 d) was significantly prolonged as compared to that of the control (3.0 d), while the pupal duration of various treatment groups was significantly shortened as compared to that of the control, and the male pupal duration was significantly longer than the female pupal duration. The pupal weight of various treatment groups was reduced as compared to that of the control, but there was no significant difference in the pupal weight between female and male. The adult longevity of various treatment groups was extended as compared to that of the control. The male adult longevity of the red light group (18.4 d) was significantly longer than the female adult longevity of this group (15.0 d), and the pre-oviposition period of the red light group (3.0 d) was the shortest and the number of eggs laid per female (1 346.0 eggs) of this group was the highest. 【Conclusion】Under certain conditions, 5 h LED light of different wavelengths in scotophase mainly affects the pupal duration, pupal weight and adult longevity of *S. litura*, but the effects vary with the wavelength.

Key words: *Spodoptera litura*; LED light; growth and development; reproduction; pupal weight; adult longevity

发光二极管(light emitting diode, LED)是继火光、白炽灯、荧光灯之后的新型照明光源,具有节能、环保、寿命长、适用性强、波长类型丰富等多种优点,广泛应用于草坪灯、交通信号灯、景观灯、水下灯和地埋灯等。已有资料表明,LED 光照对昆虫的多种行为会产生影响,如毛健夜蛾 *Brithys crini* 幼虫的假死等行为(涂小云等, 2012)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的飞行行为(蒋月丽等, 2008)及茄二十八星瓢虫 *Henosepilachna vigintioctopunctata* 成虫的取食等行为(方梅等, 2017)。此外,LED 光照对昆虫的繁殖生物学特性亦会产生影响,如 LED 影响冬尺蠖蛾 *Operophtera brumata* 的交配率(van Geffen *et al.*, 2015)、绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 的存活率(张敏, 2018)及茄二十八星瓢虫产卵量(方梅, 2018)等。因此,了解 LED 对昆虫的影响有助于了解 LED 光环境下的昆虫种群动态,为害虫预测预报提供参考和理论依据,或可为益虫的繁育提供帮助。

斜纹夜蛾 *Prodenia litura* 是世界性分布的多食性农业害虫,具有世代多、抗药性强等特点,寄主植物多达 109 科、389 种(变种)(秦厚国等, 2006)。生物因子如寄主植物(蒋立奔等, 2019)和非生物因子如温度(郝强等, 2016)、光照(利广规等, 2013; 黄玲燕, 2017)等均对其生物学特性及种群动态有显著影响。夜行性昆虫对人工光源不同波长(颜色)的敏感性和光照强度的反应,可导致其时空紊乱、被光吸引(趋光性)、脱敏反应、目标定位或辨认错误等,进而导致人工光源对生物多样性和生物圈产生不良后果(Owens and Lewis, 2018),其生态效应取决于它的强度、光谱组成以及闪烁频率(Inger *et al.*, 2014)。LED 光源因耗电量低、寿命长等诸多特点而广泛应用于农作物增产补光和城市亮化工程。斜纹夜蛾作为典型的夜行性昆虫,各虫态均可暴露于夜间不同颜色(波长)的 LED 光照下,且暴露时间长短不一,少则每晚数小时,多则通宵达旦,其生物学特性等易受夜间人工照明的影响,并呈现多样性和复杂性。因此,广泛应用的 LED 照明对斜纹夜蛾生长发育和繁殖的影响亟待研究。本研究在实验室条件下测试了暗期 5 h 不同波长 LED 照明对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响,以期探明 LED 光照对该虫种群动态的影响,也为其他害虫的测报和防治提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

1.1.1　供试虫源及管理:自南昌市艾溪湖湿地公园荷叶上采集斜纹夜蛾低龄幼虫,室温 26 ± 1℃ 下置于透明长方形塑料盒(长 × 宽 × 高 = 15.00 cm × 8.00 cm × 6.00 cm)用新鲜荷叶饲养,幼虫化蛹后分辨雌雄,并置于六孔塑料板(孔径 × 深度 = 3.50 cm × 1.66 cm)内待羽化。所得成虫在光周期 14L: 10D 下用 10% 蜂蜜水饲喂,待其交配、产卵。

1.1.2　光源:本实验所用光源有:日光灯,光照强度为 500 lx;红(620 – 625 nm)、黄(580 – 585 nm)、蓝(465 – 467 nm)、绿(520 – 523 nm)和白色(复合光)LED 灯(杭州拓亚光电科技有限公司定制球泡灯,光照强度均为 200 ± 5 lx)。

1.2　不同波长 LED 光照下斜纹夜蛾生长发育测试

收集 1.1 节中当日所产卵块置于不同波长 LED 光照条件下观察孵化情况,同一卵块于孵化后的第

3 天对未孵化的卵进行计数,统计、计算卵期和卵孵化率。每处理均观察至少 10 个卵块,并以卵块为单位计算卵期。实验组光处理设 14L: 5R: 5D, 14L: 5Y: 5D, 14L: 5B: 5D, 14L: 5G: 5D 和 14L: 5W: 5D 共 5 个处理,R, Y, B, G 和 W 为暗期开始时分别使用波长范围不同的红(620 – 625 nm)、黄(580 – 585 nm)、蓝(465 – 467 nm)、绿(520 – 523 nm)和白色(复合光)LED 照明,其光照强度根据前期关于 LED 光源对昆虫影响实验而设置,均为 200 lx;对照组光处理的光周期为 14L: 10D(其中:L 为光期,采用日光灯照明,光照强度为 500 lx, D 为暗期,不使用任何光照)。光处理的转换采用人工转换的方法;实验温度为 26 ±1℃。

上述处理的初孵幼虫在各自光温实验条件下置于长方形塑料盒中用新鲜荷叶饲养,每处理观察 100 头初孵幼虫,重复 3 次;每天于光期更换荷叶,直至化蛹,逐个记录化蛹日期,统计、计算幼虫期和化蛹率;所得蛹分辨雌雄、称重后置于六孔塑料板内观察羽化情况,逐个记录羽化日期,统计、计算蛹期和羽化率。

1.3 不同波长 LED 光照下斜纹夜蛾繁殖测试

收集 1.1 节中当日所产卵在 14L: 10D 条件下孵化,所得幼虫用荷叶饲养至化蛹,记录蛹羽化日期,所得成虫用 10% 蜂蜜水饲喂,并置于透明长方形塑料盒内观察交配和产卵情况,每天于光期更换塑料盒和蜂蜜水,并对所产卵计数,记录成虫死亡日期,根据羽化日期和死亡日期计算其寿命。实验组光处理和对照组光处理设置同 1.2 节,实验温度为 26 ±1℃,每处理观察的成虫成功交配对数不少于 18 对。上述试虫均为室内第 2 代。

1.4 数据分析

实验数据利用 SPSS16.0 分析软件进行单因素方差分析或配对样本 *t* 检验。

2 结果

2.1 不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾生长发育的影响

2.1.1 对卵孵化率、化蛹率、成虫羽化率的影响:暗期不同波长 LED 光源处理 5 h 对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率影响略有不同(表 1)。绿光组卵孵化率最低(58.3%),白光组最高(95.3%),但各处理组及对照组间差异均不显著($df1 = 5$, $df2 = 12$, $F = 2.085$, $P = 0.138$);黄光组的化蛹率最低(仅为 49.3%),且各处理组幼虫的化蛹率均低于对照组,但差异均不显著($df1 = 5$, $df2 = 12$, $F = 2.060$, $P = 0.142$);对照组成虫羽化率最高,为 67.5%,其余各组间成虫羽化率差异不显著($df1 = 5$, $df2 = 12$, $F = 1.966$, $P = 0.157$),在 40% 左右,均低于对照组。

表 1 暗期不同波长 LED 光照 5 h 对斜纹夜蛾的卵孵化率、化蛹率和成虫羽化率的影响

Table 1 Effect of exposure to LED light of different wavelengths for 5 h in scotophase on the egg hatching rate, pupation rate and adult eclosion rate of *Spodoptera litura*

LED 光 LED light	卵孵化率(%) Egg hatching rate	化蛹率(%) Pupation rate	成虫羽化率(%) Adult eclosion rate
14L: 5R: 5D	79.9 ±6.2 a	60.3 ±26.0 a	43.7 ±18.4 a
14L: 5Y: 5D	84.7 ±14.5 a	49.3 ±26.1 a	36.7 ±26.3 a
14L: 5B: 5D	67.0 ±27.6 a	64.3 ±5.8 a	45.3 ±3.8 a
14L: 5G: 5D	58.3 ±8.8 a	58.7 ±4.0 a	40.0 ±1.0 a
14L: 5W: 5D	95.3 ±3.8 a	60.3 ±6.4 a	44.7 ±5.0 a
14L: 10D (CK)	85.7 ±14.9 a	87.9 ±4.5 a	67.5 ±3.5 a

表中 L 和 D 分别代表光期和暗期;R, Y, B, G 和 W 分别代表红(620 – 625 nm)、黄(580 – 585 nm)、蓝(465 – 467 nm)、绿(520 – 523 nm)和白色(复合光)LED 光照。数据为平均值 ± 标准差,同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$, Duncan 氏多重比较)。In the table, L and D mean photophase and scotophase, respectively. R, Y, B, G and W mean red (620 – 625 nm), yellow (580 – 585 nm), blue (465 – 467 nm), green (520 – 523 nm) and white (composite) LED light, respectively. Data are mean ± *SD*, and different letters after the data in the same column show significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple comparison). 表 2 ~ 4 同 The same for Tables 2 – 4.

2.1.2 对发育历期的影响:暗期不同波长 LED 光源处理 5 h 对斜纹夜蛾卵、幼虫和蛹发育历期的影响不同(表 2)。黄光处理组的卵期(4.0 d)显著长于对照组(3.0 d),其他光处理组卵期与对照组相等或差异不显著($df1 = 5$, $df2 = 12$, $F = 4.100$, $P = 0.021$)。

暗期不同波长 LED 光源处理下,斜纹夜蛾雌幼虫期差异显著。各色光处理组的雌幼虫期与对照组相比差异不显著($P > 0.05$),但黄、红和蓝光下的雌幼虫期显著长于绿光下的雌幼虫期(21.3 d)($df1 = 5$, $df2 = 528$, $F = 2.306$, $P = 0.043$);不同波长 LED 光处理下雄幼虫期亦以黄光下最长(22.4 d),其次是白光组和对照组(均为 21.8 d)及红光和蓝光组(均为 21.7 d),绿光下最短(21.1 d)($df1 = 5$, $df2 = 513$, $F = 4.529$, $P = 0.000$)。

暗期不同波长 LED 光源处理 5 h 下雌雄蛹的蛹期差异亦显著。各色光处理组的雌蛹蛹期显著短于

表 2　暗期不同波长 LED 光照处理 5 h 对斜纹夜蛾发育历期的影响

Table 2　Effect of exposure to LED light of different wavelengths for 5 h in scotophase on the developmental duration of *Spodoptera litura*

LED 光 LED light	卵期(d) Egg duration	幼虫期 Larval duration (d)		蛹期 Pupal duration (d)	
		♀	♂	♀	♂
14L∶5R∶5D	3.0 ±0.0 b	22.0 ±1.9 a (98)	21.7 ±1.8 b (83)	14.4 ±1.7 b (76)	17.1 ±1.6 bc* (55)
14L∶5Y∶5D	4.0 ±0.0 a	22.2 ±1.4 a (75)	22.4 ±1.8 a (73)	14.2 ±2.0 bc (62)	17.3 ±1.2 b* (46)
14L∶5B∶5D	3.3 ±0.5 b	21.9 ±1.5 a (101)	21.7 ±1.6 b (92)	13.7 ±1.5 c (77)	16.8 ±1.3 bc* (59)
14L∶5G∶5D	3.3 ±0.5 b	21.3 ±1.8 b (77)	21.1 ±1.7 c (99)	13.8 ±1.2 c (59)	16.4 ±1.3 c* (60)
14L∶5W∶5D	3.0 ±0.0 b	21.8 ±2.1 ab (97)	21.8 ±2.2 b (84)	13.9 ±1.7 c (72)	17.1 ±1.7 bc* (61)
14L∶10D (CK)	3.0 ±0.0 b	21.7 ±1.6 ab (86)	21.8 ±1.41 b (88)	19.9 ±1.3 a (59)	21.7 ±4.7 a* (50)

括号内数据为样本数；星号表示雌雄间差异显著($P<0.05$, t 检验)。Data in brackets are the number of samples. The asterisk means significant difference between female and male ($P<0.05$, t-test). 表 3 和 4 同 The same for Tables 3 and 4.

对照组(19.9 d)($P<0.05$)，蓝、绿和白光组的雌蛹蛹期又显著短于红光组($df1=5$, $df2=399$, $F=134.170$, $P=0.000$)；各色光处理组的雄蛹蛹期亦显著短于对照组(21.7 d)，黄光组的雄蛹蛹期(17.3 d)显著长于绿光组(仅为 16.4 d)($df1=5$, $df2=325$, $F=39.433$, $P=0.000$)。

同色光下雌雄幼虫发育历期差异均不显著(t 检验，红光：$P=0.325$；黄光：$P=0.529$；蓝光：$P=0.544$；绿光：$P=0.421$；白光：$P=0.897$；对照组：$P=0.821$)，但雄蛹期均极显著性长于雌蛹期(t 检验，$P=0.000$)。

2.1.3　对斜纹夜蛾蛹重的影响：暗期不同波长 LED 光处理 5 h 对斜纹夜蛾蛹重影响显著(表 3)，暗期给予光照后蛹重均减轻，与对照组有显著性差异($P<0.05$)，尤其是给予红光时所得蛹重最轻。红光下雌蛹重仅为 0.171 g，其他色光雌蛹重在 0.185 ~ 0.191 g 之间，且均显著小于对照组(0.203 g)($df1=5$, $df2=399$, $F=6.878$, $P=0.000$)；红光下雄蛹重仅为 0.177 g，与黄光和绿光组相比差异显著($P<0.05$)，且各色光处理组雄蛹重均显著小于对照组(0.208 g)($df1=5$, $df2=325$, $F=6.148$, $P=0.000$)。

红、黄、蓝、绿光组及对照组的雄蛹重均大于雌蛹重，白光组则相反，但差异均不显著(t 检验，红光：$P=0.213$；黄光：$P=0.914$；蓝光：$P=0.645$；绿光：$P=0.155$；白光：$P=0.997$；对照组：$P=0.305$)。

2.2　不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾繁殖的影响

暗期给予各色光均显著性延长了雌虫的寿命(表 4)($df1=5$, $df2=114$, $F=7.261$, $P=0.000$)，蓝光、绿光和白光下寿命最长(均为 17.5 d)，其他依次是黄光和红光(分别为 15.4 d 和 15.0 d)，对照组仅为 12.3 d；对于雄成虫而言，红光和绿光下寿命最长(均为 18.4 d)，其他依次是蓝光(17.9 d)、白光(17.2 d)和黄光(15.0 d)下，对照组仅为 14.4 d，但各组间差异不显著($df1=5$, $df2=114$, $F=2.270$, $P=0.052$)。进一步比较雌雄虫寿命，结果表明红光组雄虫寿命显著长于雌虫(t 检验，$P=0.006$)，其他处理组及对照组雌雄虫寿命差异不显著(t 检验，黄光：$P=0.737$；蓝光：$P=0.768$；绿光：$P=0.514$；白光：$P=0.842$；对照组：$P=0.073$)。

与对照组相比，红光缩短了产卵前期，但差异不显著；蓝光则显著性延长了产卵前期，而其他光亦延长了其产卵前期，但与对照组相比差异均不显著($df1=5$, $df2=114$, $F=3.973$, $P=0.002$)。

与对照组相比，红光显著增加了雌虫的单雌产卵量，黄光和白光亦增加了单雌产卵量，但差异均不显著；绿光和蓝光则降低了其单雌产卵量，但与对照组相比差异亦不显著($df1=5$, $df2=114$, $F=3.554$, $P=0.005$)。

表 3　暗期不同波长 LED 光照处理 5 h 对斜纹夜蛾蛹重的影响

Table 3　Effect of exposure to LED light of different wavelengths for 5 h in scotophase on the pupal weight of *Spodoptera litura*

LED 光照 LED light	蛹重 Pupal weight (g)	
	♀	♂
14L∶5R∶5D	0.171 ±0.028 c (76)	0.177 ±0.023 c (55)
14L∶5Y∶5D	0.191 ±0.032 b (62)	0.192 ±0.038 b (46)
14L∶5B∶5D	0.185 ±0.027 b (77)	0.187 ±0.026 bc (59)
14L∶5G∶5D	0.185 ±0.029 b (59)	0.193 ±0.032 b (60)
14L∶5W∶5D	0.187 ±0.039 b (72)	0.186 ±0.030 bc (61)
14L∶10D (CK)	0.203 ±0.036 a (59)	0.208 ±0.031 a (50)

表 4 暗期不同波长 LED 光照 5 h 对斜纹夜蛾成虫寿命和繁殖的影响

Table 4 Effect of exposure to LED light of different wavelengths for 5 h in scotophase on the longevity and reproduction of *Spodoptera litura* adults

LED 光 LED light	交配对数 Number of mated pairs	成虫寿命 Adult longevity (d)		产卵前期(d) Pre-oviposition period	单雌产卵量 Number of eggs laid per female
		♀	♂		
14L: 5R: 5D	21	15.0 ±2.9 c	18.4 ±4.6 a*	3.0 ±1.9 c	1 346.0 ±582.9 a
14L: 5Y: 5D	21	15.4 ±3.1 bc	15.0 ±4.9 a	5.0 ±2.5 ab	943.3 ±557.1 b
14L: 5B: 5D	20	17.5 ±3.8 ab	17.9 ±5.6 a	6.1 ±2.4 a	760.6 ±447.8 b
14L: 5G: 5D	19	17.5 ±2.6 ab	18.4 ±5.7 a	4.8 ±2.4 ab	900.6 ±210.7 b
14L: 5W: 5D	20	17.5 ±5.0 a	17.2 ±6.0 a	4.6 ±2.4 b	1042.8 ±435.5 b
14L: 10D (CK)	19	12.3 ±2.2 d	14.4 ±4.5 a	4.1 ±2.4 bc	919.0 ±519.3 b

3 结论与讨论

3.1 暗期不同波长 LED 光照处理对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率、成虫羽化率的影响

结果表明暗期不同波长 LED 光照 5 h 处理对斜纹夜蛾卵孵化率、化蛹率、成虫羽化率影响不同,但差异均不显著(表 1)。

与对照组相比,绿光和蓝光组卵孵化率降幅较大(表 1)。绿光降低卵孵化率的现象也见于绿盲蝽(张敏, 2018);蓝光降低卵孵化率的现象也有报道,如小贯小绿叶蝉 *Empoasca onukii* (陈伟忠等, 2016)。而粘虫 *Mythimna separata* (董婉君, 2018)则有所不同,粘虫孵化率在 365nm 波长的处理下达到最低。除白光外,其余各处理组卵孵化率均低于对照组(表 1),这和董婉君(2018)有关不同光源对斜纹夜蛾的影响研究一致。

本研究结果中,黄光组的化蛹率最低(仅为 49.3%)(表 1),这与家蝇 *Musca domestica*、大头金蝇 *Chrysomya megacephala* 和菜粉蝶 *Pieris rapae* 化蛹率受 LED 光照影响不同(张敏, 2018)。究其原因,对于日间活动的昆虫来说,具有更多的视觉视蛋白,可以提高颜色辨别能力(Lunau, 2014; Sharkey *et al.*, 2017; Owens and Lewis, 2018),光感受器较为敏感;相比之下,夜间活动的昆虫则会失去一个或多个视蛋白,从而降低它们的视觉能力(Owens and Lewis, 2018)。

各处理组斜纹夜蛾成虫羽化率均低于对照组(表 1),表明实验所用 LED 光照对斜纹夜蛾成虫羽化率有影响但差异不大,然而橙黄色 LED 光照(575 nm)显著降低了绿盲蝽、菜粉蝶的成虫羽化率(张敏, 2018)等。

昆虫的抗氧化酶活性受光波长的影响,如西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* (吴蕾, 2010)和梨小食心虫 *Grapholita molesta* (方程, 2015),LED 光照对斜纹夜蛾存活的影响是否也与抗氧化酶活性有关有待于进一步研究。

3.2 暗期不同波长 LED 光照处理对斜纹夜蛾发育历期和蛹重的影响

实验结果表明,不同波长 LED 光照处理对斜纹夜蛾卵、幼虫和蛹发育历期的影响不同(表 2)。黄光处理组的卵期(4.0 d)显著长于对照组(3.0 d),这与小贯小绿叶蝉卵(陈伟忠等, 2016)和黄粉虫 *Tenebrio molitor* 卵(张敏, 2018)经黄光处理后卵期缩短明显不同;然而黄光却明显地延长了斜纹夜蛾的雌、雄幼虫期,尤其是雄幼虫期(表 2),又与小菜蛾 *Plutella xylostella* 经 LED 黄光处理后幼虫期缩短(蒋月丽等, 2018)不同。

已有资料显示,LED 光照对甜菜夜蛾蛹期无显著影响(刘长营等, 2010),但蓝光缩短了菜粉蝶蛹期(张敏, 2018),白光却延长了棉铃虫蛹期(Katsikis *et al.*, 2020)。而本研究结果表明,各色 LED 光照处理下蛹期均显著短于对照组(表 2),这种蛹期明显缩短的现象是因为蛹期感光的结果,还是前期光效应累计结果,我们还无法解释,需要进一步研究;本研究结果还表明,同色光下雄蛹期均极显著长于雌蛹期(表 2)。由此可见,LED 光照对昆虫发育历期的影响因昆虫种类、发育阶段和性别而异。

鳞翅目昆虫的生长发育属于完全变态发育,蛹期发育对成虫的雌雄、大小、产卵量等均有直接的影响。不同波长 LED 光照处理对斜纹夜蛾蛹重影响显著(表 3),暗期给予光照后蛹重均减轻,与对照组有显著性差异,这与白色 LED 下棉铃虫蛹重增加不同(Katsikis *et al.*, 2020)。

3.3 暗期不同波长 LED 光照处理对斜纹夜蛾成虫寿命和繁殖的影响

暗期给予各色光均能延长成虫寿命,尤其是显著性延长了雌虫的寿命(表 4),究其原因可能是延

长光照促进了成虫取食,但需要进一步研究证实。LED 光照影响成虫寿命的现象也见于其他昆虫,如白光和黄光 LED 能延长甜菜夜蛾成虫寿命(刘长营等, 2010),黄光和绿光却分别缩短小菜蛾(段云等, 2007)和梨小食心虫(于海利, 2011)雌成虫寿命。

本研究结果还表明,不同波长 LED 光照处理影响斜纹夜蛾的产卵前期和产卵量(表 4)。与对照组相比蓝光显著延长了产卵前期,且单雌产卵量最低(表 4),这种蓝光降低产卵量的现象也见于灰飞虱 *Laodelphax striatellus*(朱锦磊等, 2014)。究其原因,可能是由于雌性蛾类性信息素的分泌会受到夜间 LED 光照的干扰,降低了交配率,从而影响其正常的生殖行为,同时这种影响因不同波长而存在明显差异(van Geffen *et al*., 2015)。与对照组相比,红光处理显著增加了产卵量,原因可能有二:一是红光下雌成虫产卵前期缩短、产卵提前所致,类似的产卵提前、产卵量显著增加的现象也见于螟蛾稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*(孙贝贝等, 2013);二是 200 lx 的光强可能对斜纹夜蛾繁殖有利,因另一种卷叶蛾梨小食心虫也是在 200 lx 的光强下繁殖力最大(贾晓婷, 2016)。而蛾类作为红色盲,红光本应不会影响斜纹夜蛾繁殖,但本研究结果表明 LED 红光显著提高了斜纹夜蛾产卵量,我们还无法从生理上合理解释这一现象。

综上所述,暗期延长 5 h 不同波长 LED 光照对斜纹夜蛾生长发育及繁殖均有影响,主要表现为蛹期延长、蛹重减轻;成虫寿命延长,尤其是雌虫。然而,实验中观察到配对的斜纹夜蛾雌成虫暗期给予连续日光灯照射仍能产卵,那么,暗期给予连续 LED 光照产卵、产卵量有何变化,还有待于进一步研究。

参考文献(References)

Chen WZ, Huang HS, Chen XH, Chen RR, Chen SP, Cai CD, 2016. The influence of light on the hatching of eggs of *Empoasca onukii* in tea garden. *Newsl. Seric. Tea*, (4): 22－24. [陈伟忠, 黄伙水, 陈秀辉, 陈若荣, 陈思藩, 蔡创钿, 2016. 光对茶园小贯小绿叶蝉卵孵化的影响. 蚕桑茶叶通讯, (4): 22－24]

Dong WJ, 2018. Effects of Different Light Sources on the Growth and Reproduction of Five Insects. MSc Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan. [董婉君, 2018. 不同光源对五种昆虫生长发育和繁殖的影响研究. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文]

Duan Y, Wu YQ, Yang SF, Wu RH, Zhao MX, 2007. Effects of yellow light on the biology of *Plutella xylostella*. *Plant Prot*., 33(6): 110－112. [段云, 武予清, 杨淑斐, 吴仁海, 赵明茜, 2007. 黄色灯对小菜蛾成虫生物学的影响. 植物保护, 33(6): 110－112]

Fang C, 2015. Effects of Different Lights on Main Biological Parameters and Protective Enzymes of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). MSc Thesis, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [方程, 2015. 光照对梨小食心虫 *Grapholita molesta* (Busck)主要生物学参数及保护酶活性的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文]

Fang M, 2018. Effects of Light Factors on the Biological Characteristics of *Henosepilachna vigintioctopunctata* Fabricius Adult. MSc Thesis, Jiangxi Normal University, Nanchang. [方梅, 2018. 光因子对茄二十八星瓢虫成虫生物学特性的影响. 南昌: 江西师范大学硕士学位论文]

Fang M, Dai ZY, Shuai YL, Liang LY, Zhang CQ, Xie JK, Tu XY, 2017. Effects of varying temporal exposure to light on the feeding and walking behavior of adult *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Fabricius). *Chin. J. Appl. Entomol*., 54(5): 813－823. [方梅, 戴志颖, 帅艳玲, 梁龙阳, 张超群, 谢建坤, 涂小云, 2017. 光期位点对茄二十八星瓢虫成虫取食和爬行行为节律的影响. 应用昆虫学报, 54(5): 813－823]

Hao Q, Huang Q, Liang WB, Gong CW, Wang XG, 2016. Age-stage two-sex life tables of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) at different temperatures. *Acta Entomol. Sin*., 59(6): 654－662. [郝强, 黄倩, 梁炜博, 贡常委, 王学贵, 2016. 不同温度下斜纹夜蛾的两性生命表. 昆虫学报, 59(6): 654－662]

Huang LY, 2017. Silencing of Photoreceptor *CRY*1 Gene and Its Effect on the Expression of Reproduction-related Genes in *Spodoptera litura*. MSc Thesis, Yunnan University, Kunming. [黄玲燕, 2017. 斜纹夜蛾光受体 *CRY*1 基因沉默及其对生殖相关基因表达影响研究. 昆明: 云南大学硕士学位论文]

Inger R, Bennie J, Davies TW, Gaston KJ, 2014. Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. *PLoS ONE*, 9(5): e98631.

Jia XT, 2016. The effect of Photoperiod and Light Intensity on *Grapholitha molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) Calling Behavior and Fecundity. MSc Thesis, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi. [贾晓婷, 2016. 光周期和光强对梨小食心虫求偶行为和生殖力的影响. 山西晋中: 山西农业大学硕士学位论文]

Jiang LB, Lin S, Chen Y, Yu Y, Chen YX, Tian HJ, Wei H, 2019. Fecundity of adult *Spodoptera litura* affected by diet. *Fujian J. Agric. Sci*., 34(2): 235－240. [蒋立奔, 林硕, 陈勇, 余芸, 陈艺欣, 田厚军, 魏辉, 2019. 寄主对斜纹夜蛾实验种群生殖力的影响. 福建农业学报, 34(2): 235－240]

Jiang YL, Duan Y, Wu YQ, 2008. Effects of green-yellow light with three different wavelengths on the oviposition biology of *Spodoptera exigua* (Hübner). *J. Plant Prot*., 35(5): 473－474. [蒋月丽, 段云, 武予清, 2008. 三种不同波长绿-黄光对甜菜夜蛾产卵生物学的影响. 植物保护学报, 35(5): 473－474]

Jiang YL, Zhang JZ, Yuan SX, Li T, Gong ZJ, Miao J, Duan Y, Lv CF, Wu YQ, 2018. Progresses in the research and application of yellow light for pest control. *Plant Prot*., 44(3): 6－10. [蒋月丽, 张建周, 袁水霞, 李彤, 巩中军, 苗进, 段云, 吕春芳, 武

予清, 2018. 黄色灯防治害虫的研究与应用进展. 植物保护, 44(3): 6-10]

Katsikis CI, Wang P, Zalucki MP, 2020. Life history traits of a key agricultural pest, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): are laboratory settings appropriate? *Aust. Entomol.*, 59(1): 189-201.

Li GG, Lv SX, Yang X, Xu SL, Zheng CG, Chen QJ, 2013. Influence of the photoperiod on the artificial rearing, *Sprodoptera litura* (Fabricius). *Guangdong Agric. Sci.*, 40(10): 89-90, 116. [利广规, 吕思行, 杨欣, 徐树兰, 郑常格, 陈其津, 2013. 光周期对人工半合成饲料饲养斜纹夜蛾的影响. 广东农业科学, 40(10): 89-90, 116]

Liu CY, Liu ST, Duan AJ, Zhang ZQ, Wu YQ, 2010. Effect of the different illuminations in the adult stage of beet armyworm on the beet armyworm growth. *J. Anhui Agric. Sci.*, 38(11): 5698-5699. [刘长营, 刘顺通, 段爱菊, 张自启, 武予清, 2010. 成虫期不同光照处理对甜菜夜蛾的影响. 安徽农业科学, 38(11): 5698-5699]

Lunau K, 2014. Visual ecology of flies with particular reference to colour vision and colour preferences. *J. Comp. Physiol. A*, 200(6): 497-512.

Owens ACS, Lewis SM, 2018. The impact of artificial light at night on nocturnal insects: a review and synthesis. *Ecol. Evol.*, 8(22): 11337-11358.

Qin HG, Wang DD, Ding J, Huang RH, Ye ZX, 2006. Host plants of *Spodoptera litura*. *Acta Agric. Jiangxi*, 18(5): 51-58. [秦厚国, 汪笃栋, 丁建, 黄荣华, 叶正襄, 2006. 斜纹夜蛾寄主植物名录. 江西农业学报, 18(5): 51-58]

Sharkey CR, Fujimoto MS, Lord NP, Shin S, McKenna DD, Suvorov A, Martin GJ, Bybee SM, 2017. Overcoming the loss of blue sensitivity through opsin duplication in the largest animal group, beetles. *Sci. Rep.*, 7(1): 8.

Sun BB, Zhang L, Jiang XF, Luo LZ, 2013. Effects of temperature on reproduction in the rice leaf roller. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 50(3): 622-628. [孙贝贝, 张蕾, 江幸福, 罗礼智, 2013. 成虫期温度对稻纵卷叶螟生殖特性的影响. 应用昆虫学报, 50(3): 622-628]

Tu XY, Chen YS, Chen J, Hu ZL, Jin YQ, Xu F, 2012. Effects of different LED light sources on the behavior of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomol. Sin.*, 55(10): 1185-1192. [涂小云, 陈元生, 陈娟, 胡章龙, 金义钦, 徐飞, 2012. 不同波段 LED 光源对毛健夜蛾行为的影响. 昆虫学报, 55(10): 1185-1192]

van Geffen KG, van Eck E, de Boer RA, van Grunsevn RHA, Salis L, Berendse F, Veenendaal EM, 2015. Artificial light at night inhibits mating in a geometrid moth. *Insect Conserv. Divers.*, 8(3): 282-287.

Wu L, 2010. The Influences of Environmental Stress on Adult *Locusta migratoria tibetensis*'s Food Consumption, Growth and Antioxidant Enzymes. MSc Thesis, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan. [吴蕾, 2010. 环境胁迫对西藏飞蝗成虫取食生长和抗氧化酶系统的影响. 四川雅安: 四川农业大学硕士学位论文]

Yu HL, 2011. The Phototaxis of *Grapholitha molesta* Busck and the Effect of Green Light on Its Biological Characteristics. MSc Thesis, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [于海利, 2011. 梨小食心虫 *Grapholita molesta* Busck 的趋光性及绿光对其生物学特性的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文]

Zhang M, 2018. Effects of Different Light Conditions on Biological Characteristics of Five Insect Species. MSc Thesis, Huazhong Agricultural University, Wuhan. [张敏, 2018. 不同光环境对 5 种昆虫生物学特性的影响研究. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文]

Zhu JL, Zhu W, Liu HA, Lu YR, Zhang CM, 2014. Effects of LED lights on phototaxis and reproduction of small brown planthopper. *Jiangsu J. Agric. Sci.*, 30(3): 508-513. [朱锦磊, 朱伟, 刘怀阿, 陆玉荣, 张春梅, 2014. 灰飞虱对 5 种波长 LED 的趋光性比较及蓝光对灰飞虱繁殖力的影响. 江苏农业学报, 30(3): 508-513]

(责任编辑: 赵利辉)